

不同灌溉模式对小麦干物质积累及产量经济效益的影响

张光岩, 李俊良, 徐良菊, 金圣爱*

(青岛农业大学, 山东 青岛 266109)

摘要:【目的】实现小麦生产高产高效。【方法】以强筋小麦烟农21号为研究对象, 设置漫灌、小型微喷灌、大型微喷灌、高架微喷及滴灌5种灌溉模式, 研究了相同灌水量条件下, 不同灌溉模式对小麦干物质、氮磷积累、转运及吸收利用以及产量、经济效益的影响。【结果】不同灌溉模式对小麦干物质累积与转移具有显著影响, 滴灌模式下小麦花前干物质累积量较其他灌溉模式高38.0%~59.2%。滴灌模式下小麦转移干物质对籽粒贡献率较漫灌、小型微喷、大型微喷、高架微喷灌溉模式分别高104.8%、421.0%、129.0%、126.8%。小麦氮磷积累、转移方面, 滴灌模式下小麦氮磷花前累积量、转移量、转移氮磷对籽粒贡献率均显著高于其他灌溉模式。滴灌模式下小麦产量及经济效益显著高于其他灌溉模式。小型微喷、大型微喷、高架微喷、滴灌灌溉模式经济效益较漫灌模式分别高25.0%、23.4%、25.4%、77.0%。【结论】在灌水量相同的情况下建议首选滴灌模式, 其次为高架微喷模式, 可以促进小麦养分吸收利用, 提高小麦产量、经济效益, 适于小麦进行补充灌溉。

关键词: 灌溉; 干物质积累; 养分吸收; 产量; 经济效益; 小麦

中图分类号: S512.11

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019279

张光岩, 李俊良, 徐良菊, 等. 不同灌溉模式对小麦干物质积累及产量经济效益的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 31-38.

ZHANG Guangyan, LI Junliang, XU Liangju, et al. Effects of Different Irrigation Modes on Dry Matter Accumulation and Yield Economic Benefit of Wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 31-38.

0 引言

【研究意义】黄淮海地区是我国小麦主产区之一^[1], 占全国小麦种植面积的36%~48.4%^[2-3]。调查显示, 粮食生产过程中资源短缺、生态环境恶化等问题日益突出^[4]。一方面, 农民种植粮食作物常采用撒施肥加大水漫灌的形式, 造成养分深层渗漏、地下水受到污染^[5]、肥料利用效率低^[6]。另一方面, 黄淮海地区水资源总量仅占全国水资源总量的7%左右^[7], 且该区域60%~80%的降水主要集中在每年的6—9月^[3]。在小麦生育期内降水量只有50~150 mm^[8-9], 但该区小麦耗水总量450 mm左右, 灌溉水需求量大。目前, 黄淮海地区节水灌溉面积仅占耕地面积的26.2%^[3]。在节水灌溉面积中, 黄淮海地区微灌只占0.8%, 滴灌仅占11.5%。姜文来等^[3]研究表明, 黄淮海地区粮食作物的灌溉方式仍以渠灌为主。因此, 研究不同灌溉模式对冬小麦产量和经济效益具有现实意义。

【研究进展】微喷、滴灌水肥一体化是目前小麦

等大田作物上应用比较广的灌溉技术^[10]。虎净等^[11]研究表明, 滴灌水肥一体化施肥可有效减少养分损失, 保证作物养分供应^[12-15], 提高小麦籽粒产量; 李小利等^[16]通过田间小麦试验发现, 滴灌可促进小麦叶片生长, 减缓生育后期叶面积指数的下降速率, 增加干物质积累; 陈静等^[17]研究发现滴灌施肥可显著增加冬小麦的有效穗数, 使小麦产量和水分利用效率分别提高了21.1%和57.5%; 程莲^[18]研究发现滴灌与漫灌相比可使小麦增产37%、节水29%、节肥14%; 武继承等^[19]研究发现与畦灌相比, 滴灌处理小麦产量增加了14.3%~19.0%。微喷灌技术有利于小麦水分利用^[20-21]。周加森等^[22]研究表明, 微喷灌有利于小麦养分利用, 提高水氮利用率; 张英华等^[23]研究表明, 微喷灌更易实现在小麦不同生育阶段水分合理分配, 适宜的微喷灌水频率及氮肥用量可以提高冬小麦产量和水分利用效率; 焦艳平等^[24]研究表明与畦灌相比, 微喷处理减轻冬小麦的光合“午休现象”, 使冬小麦产量提高8.5%。【切入点】纵观前人对冬小麦灌溉模式的研究多集中在单一滴灌或微喷与传统漫灌作比较, 较少有把小型微喷、大型微喷、高架微喷、滴灌、漫灌(农民常用模式又称小白龙灌溉)5种灌溉模式放在一起进行比较分析的。【拟解决的关键问题】本试

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200405)

作者简介: 张光岩(1993-), 女。硕士研究生, 主要从事水肥资源高效利用研究。E-mail: 891670232@qq.com

通信作者: 金圣爱(1978-), 女。副教授, 主要从事土壤与肥料科学方面的教学科研工作。E-mail: shengaij@163.com

模拟探究小型微喷、大型微喷、高架微喷、滴灌、漫灌（农民常用模式又称小白龙灌溉）5种灌溉模式对冬小麦养分吸收转移、干物质累积转移、产量及经济效益的影响，以期筛选出最优的灌溉模式，为实现冬小麦高效生产提供一定理论指导与数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年10月—2019年9月在青岛市莱西五四农场进行。莱西位于胶东半岛中部，地处东经120°12′—120°40′，北纬36°34′—37°09′，属于温带季风型大陆性气候。夏季气温高降雨多空气湿度比较大；秋季晴朗天气较多空气湿度较小；冬季持续时间较长温度低且空气湿度小。年平均气温11.3℃，年温差较小，最高气温一般出现在7月，该月平均温25.3℃；最低气温出现在1月，该月平均温-3.3℃。年均降水量为635.8 mm。主要风向为东南风和西北风，年均风速为3.6 m/s。日均平均气压为1 007.6 hPa，年均日照时间2 656.3 h，年均水汽蒸发量为1 629.0 mm。在冬小麦试验开展期间，生长季降水量177 mm，约为1 770 m³/hm²。

试验区共占地16 008 m²，试验区前茬为玉米，土壤类型为砂姜黑土。0~20 cm土层土壤基本理化指标分别为：有机质量21.91 g/kg、碱解氮量0.95 g/kg、速效钾量155.72 mg/kg、速效磷量34.55 mg/kg、pH值7.46。20~40 cm土层土壤基本理化指标分别为：有机质量17.76 g/kg、碱解氮量0.89 g/kg、速效钾量113.61 mg/kg、速效磷量18.34 mg/kg、pH值7.06。

1.2 试验设计

供试小麦品种为强筋烟农21号。试验为灌溉模式单因素试验。根据灌溉模式不同，试验共设置5个处理：漫灌（T1）：小区总长54 m、总宽49.6 m，总占地面积2 678.4 m²；小型微喷（T2）：小区总长56 m、总宽52 m，总占地面积2 912 m²；大型微喷（T3）：小区总长80 m、总宽56 m，总占地面积4 480 m²；高架微喷（T4）：小区总长86 m、总宽56 m，总占地面积4 816 m²；滴灌（T5）：小区总长166 m、总宽19.2 m，总占地面积3 187.2 m²。小区之间以垄隔开，取样时避开边缘4行。处理之间随机分布，每个处理3个重复。

施肥采取基施和追施相配合的方式。施肥量见表1，其中磷肥（过磷酸钙量为20%）、钾肥（氯化钾量为50%）、有机肥（有机质量为72%，氮量为3.28%，P₂O₅量为0.42%，K₂O量为0.37%）作为基肥一次性施入；氮肥（尿素，含N量为46%）依据基追比3:2:3:2的比例在小麦返青期、拔节期、

灌浆期各追施1次，水肥同施。滴灌、小型微喷、大型微喷、高架微喷4种灌溉模式均先将当前生育期灌水量总体积的1/3水施用至处理中，然后通过文丘里施肥器将溶解有尿素的肥料液施用至当前处理中，并将剩余灌水量灌溉至处理小区内。漫灌模式则是先由人工将尿素撒入小区，然后拖拽管道进行灌溉。在小麦生育期共灌水4次，分别为蒙头水600 m³/hm²、返青水200 m³/hm²、拔节水50 m³/hm²、灌浆水150 m³/hm²，灌水总量均为1 000 m³/hm²，不同处理在同一灌水期灌水量相同。

表1 不同处理肥料施用量

处理 Treatments	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1	180	150	120
T2	160	150	120
T3	160	150	120
T4	160	150	120
T5	160	150	120

小麦以宽（20 cm）窄（18 cm）行方式播种。漫灌区（T1）采用小白龙方式灌溉。小型微喷灌溉模式（T2）喷灌带铺设方式为1带4行（2喷灌带之间共有4行小麦），喷灌带间距为0.76 m。主输水管道设置在每个小区的中间，从小区中间往二侧供水，以尽量减小压力不同引起的差异；大型微喷（T3）2根微喷管带之间的距离为3 m；高架微喷（T4）采取主管一侧打孔，2根支管之间的距离为10 m，支管上相邻高架的距离为9 m。滴灌区（T5）滴灌管铺设方式为1管4行，主输水管道设置在每个小区的中间，从小区中间往二侧供水，以尽量减小压力不同引起的差异。毛管采用迷宫式滴灌管，管径16 mm、滴头间距为20 cm，滴头流量为3 L/h。

1.3 样品测定

1.3.1 样品采集

每个试验小区分为动态采样区和测产区两部分，植物样品采集取自动态采样区，测产区专门用于成熟期测产。植物动态样分别于小麦扬花期、成熟期取样测定。在小麦扬花期、成熟期分别取地上部植株样品并测定相关指标。每个小区随机取1 m长的2行植株，合并后剪去根部，将扬花期地上部植株作为一个整体，成熟期株分为茎叶、颖壳、籽粒，分别洗净，然后取部分样品在105℃下杀青30 min，75℃烘干，称出质量计算地上部干物质质量。粉碎过筛后采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮，消煮液使用凯氏定氮仪测定全氮，钒钼黄比色法测定全磷，进而计算植物吸收氮磷的量^[25]。收获时取9 m²样方脱粒烘干计产。

SPAD 值使用 SPAD-502 SPAD 仪在田间试验小区内随机选取 15 株小麦旗叶测定，每片旗叶从上中下测定 3 次取平均值作为该片旗叶 SPAD 值。

1.3.2 计算指标及公式

假定冬小麦生殖生长期干物质没有损失，营养器官(茎叶、颖壳)生物量减少部分均转移到籽粒中，则营养器官干物质向籽粒转移指标计算式^[26-28]为：花前干物质累积量(kg/hm²)=花期(扬花期)地上部干物质累积量；干物质转移量(kg/hm²)=花期(扬花期)地上部干物质累积量-成熟期地上部营养器官干物质累积量(茎叶+颖壳)；转移干物质对籽粒的贡献率(%)=干物质转移量/籽粒产量×100%。

假设小麦在生殖生长期氮、磷未损失，营养器官(茎叶和颖壳)中减少的氮、磷均转移至籽粒，则营养器官氮、磷向籽粒转移计算式为：花前氮(磷)累积量(kg/hm²)=花期地上部氮(磷)累积量=地上部干物质质量×氮(磷)质量分数；氮(磷)转移量(kg/hm²)=花期(扬花期)地上部氮(磷)累积量-收获期地上部营养器官(茎叶+颖壳)氮(磷)累积量；氮(磷)转移效率=氮(磷)转移量/花期(扬花期)地上部氮(磷)累积量×100%；转移氮(磷)贡献率=氮(磷)转移量/籽粒氮(磷)累积量×100%。

1.4 数据分析

使用 Office 2010 进行数据整理与计算，用

表 2 不同灌溉模式小麦不同生育期旗叶 SPAD 值

Table 2 SPAD of flag leaves at different growth stages of wheat under different irrigation modes

处理 Treatments	孕穗期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Pustulation stage	蜡熟期 Dough stage	成熟期 Mature stage
T1	50.6±1.0bc	56.7±0.4b	60.0±0.6a	58.8±1.6a	24.9±2.2b
T2	49.2±1.1c	58.0±1.3ab	58.1±0.8b	57.9±0.6a	21.7±2.6b
T3	51.1±1.2b	56.6±0.7b	58.1±1.4b	54.0±3.6b	20.9±0.8b
T4	51.2±1.0b	59.0±0.4a	59.9±0.6a	55.8±0.5ab	25.5±0.1b
T5	54.2±0.3a	56.8±2.1b	58.7±1.0ab	56.2±1.2ab	32.9±6.4a

注 同一列数值后的不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著，下同。

Note Different letters indicated that there was significant difference between the treatments at the level of $P<0.05$, the same as below.

2.2 不同灌溉模式对冬小麦干物质积累的影响

不同灌溉模式对冬小麦干物质累积转移的影响如表 3 所示。由表 3 可知，T5 处理花前干物质累积量较其他处理高 38.0%~59.2%，差异显著。不同处理小麦转移干物质对籽粒贡献率和干物质转移量差异均表现为 T5 处理显著高于其他处理，T2 处理最低，T3、T4 处理之间无显著性差异。T5 处理小麦干物质转移量较 T1、T2、T3、T4 处理分别高 146.9%、533.7%、184.1%、165.5%，T1、T3、T4 处理之间无显著性差异。T5 处理转移干物质对籽粒贡献率较 T1、T2、T3、T4 处理分别高 104.8%、421.0%、129.0%、126.8%，差异显著。T2 处理小麦花前干物质累积量、干物质

DPS2015 进行数据统计分析，LSD 法比较处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式对小麦旗叶 SPAD 值的影响

不同灌溉模式对小麦不同生育期旗叶 SPAD 值的影响如表 2 所示。由表 2 可知，不同灌溉模式对小麦不同生育期旗叶 SPAD 值的影响不同。不同处理小麦旗叶 SPAD 值均在灌浆期达到最大值，至成熟期降至最小值。孕穗期、成熟期 T5 处理小麦旗叶 SPAD 值显著高于其他处理，扬花期 T4 处理小麦旗叶 SPAD 值最高，灌浆期、蜡熟期 T1 处理小麦旗叶 SPAD 最高。灌浆期之前，T4 处理小麦旗叶 SPAD 值均高于 T1 处理，灌浆期与蜡熟期 T4 处理小麦旗叶 SPAD 值低于 T1 处理。从灌浆期到成熟期 T2、T3 处理小麦旗叶 SPAD 值均低于 T1 处理。从蜡熟期到成熟期，T1、T2、T3、T4、T5 处理小麦旗叶 SPAD 值分别降低 57.7%、62.5%、61.3%、54.3%、41.5%，T4、T5 处理小麦旗叶 SPAD 值降低幅度低于 T1 处理。成熟期 T5 处理小麦旗叶 SPAD 值较 T1 处理高 32.1%。从蜡熟期到成熟期小麦旗叶 SPAD 值变化幅度来看，仅 T5 处理小麦旗叶 SPAD 值降低幅度小于 50%，因此 T5 处理有利于减缓小麦旗叶 SPAD 值的降低。

转移量及转移干物质对籽粒贡献率均低于其他处理。

2.3 不同灌溉模式对冬小麦氮素吸收转移的影响

不同灌溉模式对冬小麦氮素吸收转移的影响如表 4 所示。由表 4 可知，T5 处理花前氮累积量、氮转移量、转移氮对籽粒贡献率均显著高于其他处理。T2、T3 处理花前氮累积量、氮转移量、转移氮对籽粒贡献率均显著低于 T1 处理。T4 处理花前氮累积量、氮转移量及转移氮对籽粒贡献率低于 T5 处理。T5 处理花前氮累积量较 T1、T2、T3、T4 处理分别高 38.6%、55.4%、107.7%、28.8%，差异显著。T5 处理氮转移效率最高，T3 最低，T1、T4、T5 处理之间无显著性差异。氮转移量与转移氮对籽粒贡献率均表现为 T5

处理>T4 处理>T1 处理>T2 处理>T3 处理, 处理之间差异显著。氮转移量与籽粒形成密切相关, T4、T5 处理转移氮对籽粒贡献率较 T1 处理分别高 13.1%、23.0%, 差异显著。

表 3 不同灌溉模式小麦干物质累积转移情况

Table 3 Accumulation and transfer of dry matter in wheat under different treatments

处理 Treatments	花前干物质累积量 DMABF/(kg hm ⁻²)	干物质转移量 AODMT/(kg hm ⁻²)	贡献率 ROC/%
T1	13 925.8±723.8c	2 570.0±220.0b	35.1±3.5b
T2	12 071.1±426.7c	1 001.2±187.7c	13.8±2.6c
T3	13 620.7±1 216.7bc	2 233.2±104.5b	31.4±1.5b
T4	12 769.0±1 071.5bc	2 389.7±201.3b	31.7±2.7b
T5	19 217.1±744.6a	6 344.5±965.7a	71.9±10.6a

注 DMABF-Dry matter accumulation before flowering; AODMT-Amount of dry matter transferred; ROC-Rate of contribution.

表 4 不同灌溉模式冬小麦氮素吸收转移情况

Table 4 Nitrogen absorption and transfer of winter wheat under different irrigation modes

处理 Treatments	花前氮累积 PANAQ/ (kg hm ⁻²)	氮转移量 N transfer quantity/ (kg hm ⁻²)	氮转移效率 N transfer efficiency/%	转移氮贡献率 Contribution rate/%
T1	188.4±1.8b	138.9±5.5c	73.8±3.0a	67.3±3.0c
T2	168.0±17.7c	110.9±1.4d	66.4±6.2bc	51.0±0.2d
T3	125.7±4.9d	76.6±0.8e	61.0±2.8c	33.6±0.3e
T4	202.7±16.6b	148.1±2.2b	73.3±4.8ab	76.1±2.6b
T5	261.1±2.2a	200.6±4.8a	76.8±1.2a	82.8±2.1a

注 PANAQ-Pre-anthesis N accumulation quantity.

2.4 不同灌溉模式对冬小麦磷素吸收转移的影响

不同灌溉模式下冬小麦磷素吸收转移量如表 5 所示。由表 5 可知, 不同灌溉模式对小麦磷素的吸收与转运影响明显。T5 处理小麦花前磷累积量、磷转移量及转移磷对籽粒贡献率均高于其他处理。T2、T3 处理小麦花前磷累积量、磷转移量、磷转移率及转移磷对籽粒贡献率均显著低于 T5、T1 处理。T5 处理花前磷累积量显著高于其他处理, 不同处理之间差异显著。不同处理小麦磷转移量和转移磷对籽粒贡献率差异显著。不同处理磷转移量从多到少依次为 T5 处理>T1 处理>T4 处理>T3 处理>T2 处理, 处理之间差异显著。不同处理磷转移效率均值为 40.3%, T1、T4、T5 处理磷转移效率均高于平均水平。不同处理转移磷对籽粒贡献率均值为 34.1%, T1、T4、T5 处理转移磷贡献率较均值分别高 54.3%、18.8%、74.2%。

表 5 不同灌溉模式冬小麦磷素吸收转移情况

Table 5 Phosphorus absorption and transfer of winter wheat under different irrigation modes

处理 Treatments	花前磷 累积量 PAPAQ/ (kg hm ⁻²)	磷转移量 P transfer quantity/ (kg hm ⁻²)	磷转移效率/ P transfer efficiency/%	转移磷 贡献率 Contribution rate/%
T1	24.3±0.9c	15.1±1.0b	62.1±2.1a	52.6±2.8b
T2	18.6±0.5e	1.6±0.4e	8.5±2.2d	4.4±1.0e
T3	21.2±0.9d	4.9±0.6d	23.1±2.1c	13.8±1.7d
T4	26.8±0.8b	11.9±0.7c	44.4±1.9b	40.5±2.8c
T5	31.5±1.5a	20.0±0.7a	63.5±0.9a	59.4±2.7a

注 PAPAQ-Pre-anthesis P accumulation quantity.

2.5 不同灌溉模式对冬小麦产量构成因素的影响

不同灌溉模式冬小麦产量构成因素如表 6 所示。由表 6 可知, 不同处理小麦产量构成因素差异明显。T5 处理小麦穗数较 T1、T2、T3、T4 分别多 9.7%、23.5%、18.6%、9.9%, 差异显著。T2、T3 处理小麦穗数显著低于其他处理。T1 处理小麦穗粒数最高, T2、T3、T4、T5 处理之间无显著性差异。T2 处理小麦千粒质量为 46.8 g, 显著高于其他处理, T3、T4、T5 处理之间无显著性差异。产量较高的 2 个处理是 T5 和 T4, 较低的 2 个处理是 T1 和 T3。不同处理产量均值为 7 587.2 kg/hm², 仅 T5 处理产量高于平均水平。T5 处理较 T1、T2、T3、T4 处理分别增产 22.7%、21.1%、23.9%、17.1%, 增产效果显著。

表 6 不同灌溉模式小麦产量构成因素

Table 6 Components of wheat yield under different irrigation modes

处理 Treatments	穗数 Spike number/ (万株 hm ⁻²)	单穗粒数 Spike grain number/粒	千粒质量 1000-grain weight/g	产量 Production/ (kg hm ⁻²)
T1	717.0±21.0b	41.9±2.9a	39.5±0.8c	7 188.9±120.8c
T2	636.8±10.6c	36.3±1.2b	46.8±1.5a	7 279.4±57.1cd
T3	663.3±4.7c	37.6±4.4ab	43.3±1.5b	7 118.3±147.4d
T4	715.8±34.0b	37.2±1.1b	43.0±1.7b	7 531.5±72.3b
T5	786.6±18.4a	40.6±0.7ab	41.8±0.4bc	8 818.0±46.3a

2.6 不同灌溉模式对冬小麦投入和产出的比较

不同灌溉模式下冬小麦投入和产出情况如表 7 所示。以肥料、人工、设备、种子及农药投入计算小麦生产投入, 根据当季平均小麦价格 2 450 元/t 计算产出。以单质肥料尿素 (200 元/袋, 50 kg/袋)、过磷酸钙 (150 元/袋, 50 kg/袋)、氯化钾 (250 元/袋, 50 kg/袋), 播种 (机播 1 395 元/hm²), 水肥一体化设备按照不同组成部件的使用年限及数量进行成本计算 (滴灌带及输水管道使用年限为 5 a、过滤器及

水泵等首部组成部件使用年限为 10 a), 农药、人工费 (3 120 元/hm², 包括施肥浇水) 及农机设备消耗计算投入。产出与投入二者之差为经济益。

设备及人工投入共同决定小麦生产成本。不同灌溉模式肥料成本、种子成本相同。T1 处理浇水施肥需要人工撒施肥料及人工拖拽灌溉管道进行浇水, 需多人共同协作。而 T2、T3、T4、T5 处理浇水施肥可同时进行, 仅需 1 人即可完成。因此, T1 处理浇水施肥所需人工费用较高 (3 120 元/hm²), 较 T2、T3、T4、T5 处理高 204.7%。灌溉设备投入从多到少依次为 T4 处理>T2 处理>T5 处理>T3 处理>T1 处理。

经计算可得, T2、T3、T4、T5 处理总成本均值为 8 481.4 元/hm², 较 T1 处理 (10 096.3 元/hm²) 低 16.0%。T5 处理产值较 T1、T2、T3、T4 处理分别高 22.7%、21.1%、23.9%、17.1%, 差异显著。不同处理之间经济效益差异表现与产值相同, 均表现为 T5 处理>T4 处理>T2 处理>T3 处理>T1 处理。T2、T3、T4、T5 处理经济效益较 T1 处理分别高 25.0%、23.4%、25.4%、77.0%。可以看出, 在本试验中不同灌溉方式小麦生产经济效益差异显著, 滴灌灌溉模式小麦生产经济效益最高, 且使用水肥一体化灌溉措施的 T2、T3、T4、T5 处理经济效益均显著高于漫灌灌溉模式 (T1 处理)。

表 7 不同灌溉模式投入和产出情况

Table 7 Input and output of different irrigation modes

处理 Treatments	投入/(元 hm ⁻²)			产出/(元 hm ⁻²)		
	肥料 Fertilizer	种子 Seeds	人工 Manual work	设备 Equipment	产值 Output value	经济效益 Economic benef
T1	4 841.3a	1 935.0a	3 120.0a	200.0e	17 612.8±72.3cd	7 516.5±72.3c
T2	4 841.3a	1 935.0a	1 023.8b	637.6b	17 834.5±139.8c	9 396.8±139.8b
T3	4 841.3a	1 935.0a	1 023.8b	361.3d	17 439.9±361.1d	9 278.4±361.1b
T4	4 841.3a	1 935.0a	1 023.8b	1 229.6a	18 452.3±177.0b	9 422.6±177.0b
T5	4 841.3a	1 935.0a	1 023.8b	496.7c	21 604.1±113.4a	13 307.3±113.4a

注 投入产出均按小麦每季每公顷计算, 人工投入费用按当地劳动力价格计算, 小麦价格按当季国家小麦平均价格 (2 450 元/t) 计算, 农药成本未在表中显示。

Note The input and output are calculated according to the wheat per hectare per season, the labor input is calculated according to the local labor price, and the wheat price is calculated according to the national average price of wheat in the current season (2 450 RMB/t). The costs of pesticides are not shown in the table.

3 讨 论

3.1 不同灌溉模式对冬小麦 SPAD 值及干物质累积特性的影响

叶绿素是植物进行光合作用的基础, 叶绿素量的高低在一定程度上也可间接反映作物光合作用的强弱^[29]。叶绿素量与植物生长发育密切相关, SPAD 值与叶绿素量呈正相关^[30]。不同处理小麦旗叶 SPAD 值随生育期的变化趋势相同, 均表现为随着小麦生育进程的推进, 小麦旗叶 SPAD 值先增加后降低。孕穗期, 滴灌 (T5 处理) 模式小麦 SPAD 值显著高于其他灌溉模式, 有利于小麦花前干物质的产生。较高的 SPAD 值有利于光合作用进而影响干物质的形成与积累。有研究表明, 小麦籽粒产量大部分来自花后的光合生产^[31], 籽粒产量的最终形成是花前和花后光合产物共同作用的结果^[32], 作物较高的经济产量依赖于较高的总干物质质量^[33]。研究发现, 小麦籽粒干物质的积累一方面源于花后物质产生, 另一方面源于花前累积干物质向籽粒的转移^[34-35]。因此, 干物质的累积与转移对提高籽粒产量具有重要意义。本试验中, 滴灌模式小麦干物质累积量、转移量及转移干物质对籽粒贡献率均显著高于其他处理, 因此其籽粒产量显著高于其他处理。

3.2 不同灌溉模式对冬小麦氮磷吸收的影响

小麦的产量和养分需求关系受生长环境、基因型和养分管理等多因素的影响^[36], 养分的运移与分配是决定产量高低的关键因素。本试验中, 滴灌模式氮、磷转移量及转移养分对籽粒贡献率均显著高于其他处理, 是其形成高产的重要原因之一。滴灌模式直接将水肥施入到小麦根系周围, 有利于小麦吸收利用。滴灌模式小麦后期衰老较慢, SPAD 值较高, 维持了较大的绿叶面积, 有利于养分向籽粒转移^[37]。其他 4 种灌溉模式均在不同方面制约小麦生长。小型微喷 (T2)、大型微喷 (T3) 及高架微喷 (T4)、滴灌 (T5) 灌溉模式单位时间入渗水量较少, 利于耕层充分持水, 水肥下渗速度慢, 且水肥一同进入土壤, 有利于作物吸收养分, 有利于提高水肥利用率。漫灌模式中, 先撒施肥料然后灌水, 在灌水前一部分尿素可能会有挥发损失, 漫灌模式单位时间入渗水量较大, 水分下渗过快易使肥料随水流失至耕层以下而得不到有效利用, 造成水分和养分资源浪费。小型微喷、大型微喷受小麦生长高度影响, 在小麦高度超过喷灌带喷射高度时易造成水肥分布不均, 这易造成小麦长势不均, 不利于整体产量提升。高架微喷模式水肥通过冠层然后进入土壤, 因此追施的尿素除了被小麦根系吸收外,

一部分会被小麦叶片吸收^[38-40],有利于小麦氮素吸收,这可能是高架微喷模式小麦氮吸收量较高的原因。

3.3 不同灌溉模式对冬小麦经济效益的影响

经济效益是影响农业生产的重要因素,是评价小麦种植方式是否科学高效的重要依据。肥料、种子、农药成本相同情况下,设备、人工成本投入和小麦籽粒产出决定小麦生产的经济效益。漫灌(T1处理)模式仅需拖拉机、柴油、水泵(柴油)、输水管道就能完成浇水,而高架微喷、小型微喷、大型微喷及滴灌模式需要过滤器、水泵(电动)、主管道、滴灌带、微喷带等设备才能完成浇水施肥工作。因此,高架微喷(T4处理)、小型微喷(T2处理)及滴灌(T5处理)模式设备成本投入显著高于漫灌模式。漫灌模式(T1处理)自动化程度较低,需要人工撒施肥料,拖拽管道进行浇水施肥,所需人工费用较高。高架微喷、小型微喷及滴灌模式可以达到水肥同施的效果,且单人即可完成,节约劳动力。从小麦籽粒产值来看,滴灌模式下小麦籽粒产值显著高于其他处理,漫灌模式产值最低。人工费用投入较高使漫灌模式小麦生产成本投入显著高于其他灌溉模式。且漫灌模式小麦籽粒产值仅高于高架微喷灌溉模式,显著低于其他3种灌溉模式,因此漫灌模式小麦生产经济效益较低。滴灌模式小麦生产人工投入较低且产值较高,使其经济效益显著高于漫灌模式。得益于较为显著的小麦产值的优势,滴灌模式小麦生产经济效益显著高于高架微喷、小型微喷、大型微喷下小麦生产经济效益。

4 结论

1) 在灌水量相同的情况下,滴灌模式最有利于小麦生长。与漫灌及喷灌模式相比,滴灌模式有利于促进小麦花前干物质、氮磷钾累积及向籽粒转移与分配,可获得较高的产量及经济效益。

2) 微喷灌溉模式中,高架微喷花前干物质、氮磷钾累积量、氮磷转移量及转移氮磷对籽粒贡献率均高于其他2种微喷灌溉模式,因此其产量较高,从而获得较高的经济收益。

3) 与漫灌(T1处理)模式相比,滴灌(T5处理)、小型微喷(T2处理)、大型微喷(T3处理)及高架微喷(T4处理)灌溉模式人工优势显著,省时省力。综合比较各方面差异可以看出,灌水量相同时滴灌模式小麦产量和经济效益最高,其次是高架微喷模式。

参考文献:

- [1] 李国强,周吉,路小芳,等.雨养条件下玉米穗位叶与产量关系研究[J].作物杂志,2013(3):25-28.
- LI Guoqiang, ZHOU Ji, LU Xiaofang, et al. Study on the relationship

- between ear leaf and yield of maize in rainfed condition[J]. Crops, 2013(3): 25-28.
- [2] 李国强,路小芳,曹治彦,等.2001—2015年黄淮海地区玉米产量分析及灰色模型预测[J].农业科技通讯,2017(9):85-87.
- LI Guoqiang, LU Xiaofang, CAO Zhiyan, et al. Corn yield analysis and grey model prediction in huang-huai-hai region from 2001 to 2015[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2017(9): 85-87.
- [3] 姜文来,唐华俊,罗其友,等.黄淮海地区农业综合发展战略研究[J].农业展望,2007,3(3):34-37.
- JIANG Wenlai, TANG Huajun, LUO Qiyu, et al. Huang-Huai-Hai area comprehensive development of agriculture strategy[J]. Agricultural Outlook, 2007, 3(3): 34-37.
- [4] 黎东升,曾靖.经济新常态下我国粮食安全面临的挑战[J].农业经济问题,2015,36(5):42-47.
- LI Dongsheng, ZENG Jing. Challenges to China's food security under the economic new normal [J]. Issues in Agricultural Economy, 2015, 36(5): 42-47.
- [5] 张玉铭,张佳宝,胡春胜,等.水肥耦合对华北高产农区小麦-玉米产量和土壤硝态氮淋失风险的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(3):532-539.
- ZHANG Yuming, ZHANG Jiabao, HU Chunsheng, et al. Effect of fertilization and irrigation on wheat-maize yield and soil nitrate nitrogen leaching in high agricultural yield region in North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 532-539.
- [6] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.
- JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZOU Guoyuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [7] ZHANG Y Q, KENDY E, YU Q, et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64(2): 107-122.
- [8] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109-120.
- [9] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211-218.
- [10] 张西群,檀海斌,梁建青,等.低成本小麦微喷灌溉技术研究与效果试验[J].河北农业科学,2014,18(6):45-51.
- ZHANG Xiqun, TAN Haibin, LIANG Jianqing, et al. Study on wheat micro-spray irrigation technology of low cost and effect test[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2014, 18(6): 45-51.
- [11] 虎净,危常州,宋凯,等.干旱区滴灌春小麦氮、磷、钾养分吸收规律[J].新疆农业科学,2015,52(5):808-814.
- HU Jing, WEI Changzhou, SONG Kai, et al. Law of spring wheat N, P, K absorption under drip irrigation in arid regions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(5): 808-814.

- [12] 李伏生, 陆申年. 灌溉施肥的研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 233.
- LI Fusheng, LU Shennian. Research and application of irrigation and fertilization [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 233.
- [13] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. Fertigation—水肥调控的有效措施[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 16-21.
- ZHOU Jianbin, CHEN Zhujun, LI Shengxiu. Fertigation—a efficient way to apply water and fertilizer[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(4): 16-21.
- [14] BAR-YOSEF B. Advances in fertigation[M]. Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 1999: 1-77.
- [15] HEBBAR S S, RAMACHANDRAPPA B K, NANJAPPA H V, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1): 117-127.
- [16] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 18-28.
- LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 18-28.
- [17] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1 966-1 975.
- CHEN Jing, WANG Yingchun, LI Hu, et al. Effects of drip fertigation with No-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(10): 1 966-1 975.
- [18] 程莲. 滴灌与漫灌对小麦生长的影响及经济效益比较[J]. 大麦与谷类科学, 2016, 33(3): 61-63.
- CHENG Lian. Effects of drip irrigation and flood irrigation on wheat growth and their economic benefits[J]. Barley and Cereal Science, 2016, 33 (3): 61-63.
- [19] 武继承, 杨永辉, 潘晓莹, 等. 小麦-玉米滴灌水肥一体化的节水增产效应[J]. 河南农业科学, 2017, 46(2): 16-21.
- WU Jicheng, YANG Yonghui, PAN Xiaoying, et al. Effect of drop irrigation fertigation on water-saving and yield-increasing of wheat-corn system[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(2): 16-21.
- [20] 崔嘉欣, 宁慧峰, 宋妮, 等. 旱后复水对冬小麦旗叶生理特性及籽粒产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 8-13, 55.
- CUI Jiixin, NING Huifeng, SONG Ni, et al. Physiological development and yield of winter wheat after rehydration following water stress at heading and flowing stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 8-13, 55.
- [21] 孙泽强, 康跃虎, 刘海军. 喷灌冬小麦农田土壤水分分布特征及水量平衡[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 100-107.
- SUN Zeqiang, KANG Yuehu, LIU Haijun. Soil water distribution characteristics and water balance in winter wheat field under sprinkler irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(1): 100-107.
- [22] 周加森, 马阳, 吴敏, 等. 不同水肥措施下的冬小麦水氮利用和生物效应研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 36-41.
- ZHOU Jiasen, MA Yang, WU Min, et al. Water and nitrogen utilization and biological effects of winter wheat under different water and fertilizer measures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 36-41.
- [23] 张英华, 张琪, 徐学欣, 等. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 88-95.
- ZHANG Yinghua, ZHANG Qi, XU Xuexin, et al. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 88-95.
- [24] 焦艳平, 王福田, 武剑, 等. 滴灌和微喷带灌溉对冬小麦生长及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2017, 21(6): 17-22.
- JIAO Yanping, WANG Futian, WU Jian, et al. Effects of drip irrigation and micro-sprinkler irrigation of hoses on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2017, 21(6): 17-22.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [26] ARDUINI I, MASONI A, ERCOLI L, et al. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 25(4): 309-318.
- [27] PRZULJ N, MOMCILOVIC V. Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley. I. Dry matter translocation[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 15(4): 241-254.
- [28] DORDAS C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source-sink relations[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 30(2): 129-139.
- [29] 徐凤娇, 赵广才, 田奇卓, 等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 300-306.
- XU Fengjiao, ZHAO Guangcai, TIAN Qizhuo, et al. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and processing quality of different wheat genotypes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 300-306.
- [30] YE Y L, WANG G L, HUANG Y F, et al. Understanding physiological processes associated with yield-trait relationships in modern wheat varieties[J]. Field Crops Research, 2011, 124(3): 316-322.
- [31] 李银水, 余常兵, 廖星, 等. 三种氮素营养快速诊断方法在油菜上的适宜性分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(5): 508-513.
- LI Yinshui, YU Changbing, LIAO Xing, et al. Applicability of three rapid methods of nitrogen nutrition diagnosis on rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(5): 508-513.
- [32] 孟凡德, 马林, 石书兵, 等. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(4): 693-698.
- MENG Fande, MA Lin, SHI Shubing, et al. Dynamics change of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(4): 693-698.
- [33] 吴祯, 张保军, 海江波, 等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质

- 积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(10): 1 377-1 382.
- WU Zhen, ZHANG Baojun, HAI Jiangbo, et al. Effect of different planting patterns on dry matter accumulation and distribution post-anthesis and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(10): 1 377-1 382.
- [34] ERCOLI L, LULLI L, MARIOTTI M, et al. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(2): 138-147.
- [35] GEBBING T, SCHNYDER H, KUHBACH W. The utilization of pre-anthesis reserves in grain filling of wheat. Assessment by steady-state $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ labelling[J]. Plant Cell and Environment, 1999, 22(7): 851-858.
- [36] 李云, 李金霞, 李瑞奇, 等. 灌水次数和施磷量对冬小麦养分积累量和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(6): 1 097-1 103.
- LI Yun, LI Jinxia, LI Ruiqi, et al. Effect of irrigation times and phosphorus application rate on nutrient accumulation and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(6): 1 097-1 103.
- [37] 李学军, 李立群, 张瑞轩, 等. 高产优质小麦新品种西农 979 叶面积、叶绿素含量及干物质积累的特点[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1 054-1 057.
- LI Xuejun, LI Liqun, ZHANG Ruixuan, et al. Leaf area, chlorophyll and dry matter accumulation of wheat xinong 979[J]. Journal of Triticeae Crops, 2008, 28(6): 1 054-1 057.
- [38] 姜丽娜, 李春喜, 代西梅, 等. 超高产小麦氮素吸收、积累及分配规律的研究[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(2): 53-59.
- JIANG Lina, LI Chunxi, DAI Ximei, et al. Study on the absorption, accumulation and distribution of nitrogen in super high yielding wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2000, 20(2): 53-59.
- [39] 张黛静, 杨逗逗, 马建辉, 等. 测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 47-55.
- ZHANG Daijing, YANG Doudou, MA Jianhui, et al. Effect of drip irrigation and nitrogen regulation on WUE and grain filling of winter wheat based on soil moisture measurement[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 47-55.
- [40] 赵广才. 不同种类小麦品种的籽粒蛋白质含量动态变化的研究. 冬小麦栽培研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 278-279.
- ZHAO Guangcai. Study on dynamic changes of grain protein content of different wheat varieties. Study on winter wheat cultivation[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992: 278-279.

Effects of Different Irrigation Modes on Dry Matter Accumulation and Yield Economic Benefit of Wheat

ZHANG Guangyan, LI Junliang, XU Liangju, JIN Shengai^{*}
(Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract : Our aim is to select the optimal irrigation model and provide theoretical guidance and data support for the realization of high efficiency of grain production at the same time. **【Method】** In this experiment, the strong gluten wheat Yannong No. 21 was taken as the research object, and we set five irrigation modes, including diffuse irrigation, small micro-spray irrigation, large micro-spray irrigation, elevated micro-spray irrigation and drip irrigation. The effects of different irrigation modes on dry matter accumulation, transport, absorption and utilization, yield and economic benefit of wheat were studied. **【Result】** Different irrigation modes had significant effects on the accumulation and transfer of dry matter in wheat, and the accumulation of dry matter before flowering in wheat under drip irrigation mode was 38.0%~59.2% higher than that under other irrigation modes. The contribution rate of transferred dry matter to grains in drip irrigation model was 104.8%, 421.0%, 129.0% and 126.8% higher than that in the model of diffuse irrigation, the model of small micro-spraying, the model of large micro-spraying and the model of overhead micro-spraying. In terms of nitrogen and phosphorus, all of the accumulation, transfer and the contribution rates of nitrogen (phosphorus) accumulation in wheat under drip irrigation were significantly higher than those in other irrigation models. The yield and economic benefit of wheat under drip irrigation were significantly higher than other irrigation models. In addition, the economic benefits of small micro-spraying, large micro-spraying, elevated micro-spraying and drip irrigation were 25.0%, 23.4%, 25.4% and 77.0% higher than that of the flood irrigation. **【Conclusion】** Therefore, under the condition of the same irrigation amount, it is recommended to choose drip irrigation mode, followed by elevated micro-spraying mode, which can promote the absorption and utilization of nutrients in wheat, improve wheat yield and economic benefits, and is suitable for wheat planting in dry areas.

Key words: irrigation ; dry matter accumulation; nutrient absorption; yield; economic benefit; wheat

责任编辑: 陆红飞